

*Búza Gábor* (a Bay Zoltán Közalapítvány Anyagtudományi Intézetének igazgatóhelyettese): Lézer technológiák és ipari alkalmazásai

*Lakatosné Varsányi Magda* (Bay Zoltán Közalapítvány, Anyagtudományi Intézet): A kolloidkémia legújabb eredményei és ipari alkalmazásai

*Havancsák Károly* (Bay Zoltán Közalapítvány, Nanotechnológiai Laboratórium): Nanometrológia – a nanoméret standardjai

*Cserfalvi Tamás* (Bay Zoltán Közalapítvány, Anyagtudományi Intézet): Intelligens szenzorok és környezetvédelmi alkalmazásai

*Gordos Géza* (Bay Zoltán Közalapítvány, Ipari Kommunikációs Technológiai Intézet): Mikroprocesszorok és elektronika a mindennapi életünkben

További információ: *Gál Pálné* iskolatitkár, Öveges József Gyakorló Középiskola és Szakiskola, tel.: 246-1578, e-mail: ovesges@ovesges.hu

## A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

### Felhívás jelölésre: Mikola Sándor Díj

Az oktatómunka területén elért kiemelkedő eredmények elismeréseként az Eötvös Loránd Fizikai Társulat *Mikola Sándor Díj*ban részesíti azt az általános vagy középiskolai tanár tagját, aki a kísérletezésen alapuló iskolai fizikatanításban a korszerű módszerek alkalmazásában, vagy az ilyen tanítást elősegítő tevékenységben kiváló ered-

ményt ért el. A *Mikola Sándor Díj*ből évente legfeljebb kettő osztható ki.

A jelöléseket – megfelelő indoklással – 2006. december 31-ig kérjük az ELFT címére elküldeni!

*Mester András*  
Középiskolai Oktatási Szakcsoport

## MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

### KOZMIKUS INFRAHANG-DIAGNOSZTIKA

Napjainkban már nem csodálkozunk azon, hogy hang segítségével is „láthatunk”. Sok család fényképgyűjteményében megtaláljuk a születés előtt készült magzati felvételeket, sőt, manapság már a videogyűjteményben is ott van a magzati video, amely a születendő gyermek jó minőségű mozgóképét mutatja. A felvételek titka az ultrahang. De nem kell az emberkéz alkotta eszközöket előhozunk, hogy ezt a módszert megtaláljuk: a denevér úgyszintén az ultrahangok segítségével képezi le a környező világot. A denevér számára a látás megfelelője az ultrahangok és speciális füle segítségével jön létre. Aki látott már denevért repülés közben manőverezni és rovarokra vadászni, annak egyértelmű, hogy a repülő emlős az ultrahang radarja segítségével kellő precizitással látja a környező világot (*1. ábra*).

Egy bizonyos szintig az embereknek is ad térbeli információt a hallás: a hangforrás irányát viszonylag könnyen felismerjük. Képzőművészhez viszont a visszaverődött hullámok (akár fény, akár hang) megfelelő felismerésére is szükség van. A „képzőművészetben” az emberi hallás frekvenciatarományja is határt szab: a felbontóképességet a képzőművész rezgés hullámhossza határozza meg. A levegőben mért hangsebesség mellett az 1000 Hz-es hanghoz tartozó hullámhossz 34 cm, 100 Hz-nél pedig 3,4 m. Nem

véletlen, hogy a házimozik hangrendszere csak egy mélysugárzót tartalmaz: a mély hangok hullámhossza a szoba méretével azonos nagyságrendű, így térbeli információt nem hordozhat. Rögtön érthető, hogy a denevérek szonárja a 20 és 100 kHz közötti tartományban működik. A magas frekvencia szükséges ahhoz, hogy a hullámhossz a pár milliméter–egy centiméter tartományba essen, és a felbontóképesség elegendő legyen ahhoz, hogy a szúnyog a denevér szájában landoljon. Gyorsan rájöhettünk, hogy a magzati ultrahangkészülék nem zavarná a denevérek navigációját: ott még nagyobb frekvenciára van szükség. A testszövetekben a hangsebesség is nagyobb (1500 m/s), így a kellő pontosságú leképezéshez több MHz-es frekvenciára van szükség. (Érdemes megjegyeznünk hogy a frekvenciától függetlenül ezt is ultrahangnak nevezzük!) Túl magas frekvenciát sem szabad alkalmazni, mivel a hullámhossz csökkenésével a hanghullámok egyre hamarabb elnyelődnek, így nem látunk elég mélyre az emberi testben.

A megfigyelendő objektum méretének növekedésével egyre mélyebb hangokat használhatunk. A folyók vagy tengerek mélységét jelző, vagy a tengeralfutárók navigációját segítő szonár már a hallható frekvenciatarományban működik. Filmekben sokszor hallhatjuk a



1. ábra. Éjjeli lepkére vadászó denevér

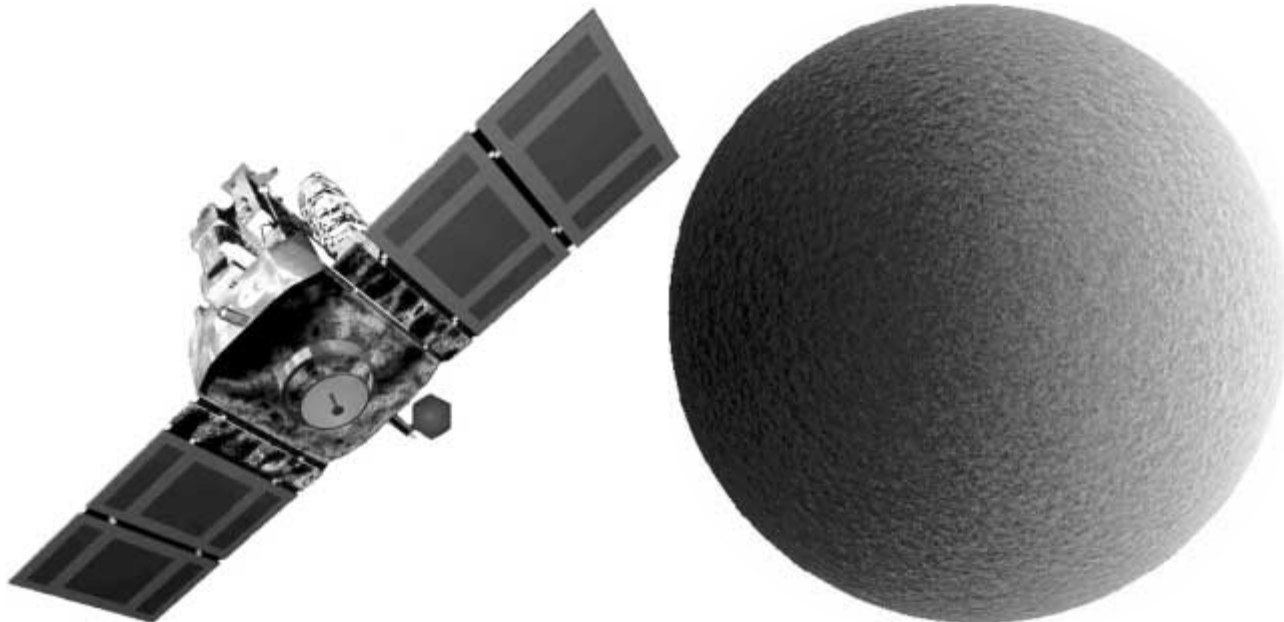
jellegzetes „ping” hangot, ami egy változó frekvenciájú zúgás. Persze az állatvilág itt is megelőzte az embert. A bálnák és a delfinek szonárt is használnak a tájékozódáshoz és „halászathoz”. Felvetődik a kérdés, hogy az infrahangok használhatók-e valamilyen diagnosztikára. (Infrahangnak nevezünk minden hangot, amelynek a frekvenciája 20 Hz alatti, így akár a nanoHz-es tartományt is!) Itt még nagyobb méretek felé kell mennünk. A legkézenfekvőbb válasz a Föld belsejének megismerése a földrengéshullámok segítségével. Ez esetben a rezgések a hallható és a közeli infrahangtartományba esnek. Ha még mélyebb hangokat akarunk találni, akkor távolabb kell mennünk.

A Földet elhagyva vajon használhatunk-e hanghullámokat diagnosztikai célra? Az égitestek közötti (bolygóközi vagy csillagközi) anyag annyira ritka, hogy gyakorlatilag vákuumnak tekinthető, így abban hanghullámok nem terjedhetnek. Az aktív radarról egyébként is le kellene mondani a nagy távolságok miatt, időben és energiában is messze lennének az alkalmazhatóságtól. Persze a hang továbbításának egyéb lehetőségei is vannak: elég csak a rádióra vagy mobiltelefonra gondolnunk, ahol a hangjelben rejlő információt rádióhullámok továbbítják. Ha vezetékes hálózaton telefonálunk, jó esély van rá, hogy, legalább részben, optikai kábelben haladó fény segítségével jut hozzánk a hang. Így elegendő lenne egy olyan mechanizmust találni a Világegyetem valamely égitestjében, amely képes a hanghullámok segítségével modulálni az elektromágneses hullámokat. Természetesen ez csak úgy jöhet létre, ha maga a hangot közvetítő anyag elektromágneses hullámokat bocsát ki. A legegyszerűbb példa ilyen közegre a gyertya lángja, amivel egy egyszerű kísérletet is elvégezhetünk: Tegyük egy, esetleg több gyertyát egy hangsugárzó elé (mélysugárzókkal biztos az eredmény): elegendő hangerő mellett (persze környezetünk nyugalomára ügyelve) a gyertya lángja az erősebb hangok hatására megremeg. Mivel a hang hullámhossza nagyobb, mint a gyertyaláng mérete, magáról az áthaladó hullámról nem kapunk teljes információt. A zene ritmusáról, esetleg a mélyebb hangok frekvenciájáról viszont jól láthatóan meggyőződhetünk.

A csillagok fénye azok fotoszférájából érkezik hozzánk. Ez az a tartomány, amely fölött a csillag anyaga már átlátszóvá válik, alatta viszont túlságosan sűrű ahhoz, hogy a fotonok kibocsátásuk után ne ütközzenek azonnal egy újabb részecskével. A fotonok útja a fotoszféráig nagyon kalandos: százezer évekig véletlenszerűen bolyonganak az elindult fotonok és azok elnyelés, újrakibocsátás útján létrejött utódai az energiát termelő magtól kiindulva a csillag belsejében. Gyakorlatilag a fotoszféra alatti teljes gömböt bejárják, míg a fotoszféra hőmérsékletének megfelelő energiaeoszlással végül kiszabadulnak a csillagból. A fotoszféra egy átmeneti tartomány, nagyon vékony a csillag sugarához képest. Ha a csillag belsejében hanghullámok mozognának, akkor ez a réteg hasonlóan viselkedne, mint a hangszóró elé tett gyertya, és a fény ingadozásából legalább a rezgések periódusára következtetni tudnánk.

A természet kegyes volt a csillagászokhoz: ténylegesen léteznek olyan csillagok, amelyekben hanghullámok terjednek. Persze a csillagok fényváltozását lényegesen korábban felismerték, mint annak ezt a hanghullámokhoz kapcsolódó magyarázatát. Egy változócsillag első dokumentált felfedezése *Fabricius* nevéhez fűződik, aki 1596-ban ismerte fel a Mira Ceti fényváltozását. A csillagbelső fizikájának felfedése egyértelműen a 20. század tudománya, de még bőven maradt tennivaló a 21. századra is. A csillagok hanghullámjai nagyon hangosak: a rezgések amplitúdója akkora, hogy a fotoszféra hőmérséklete több száz foknyit ingadozhat egy rezgés alatt. Ez a hőmérséklet-különbség pedig már elegendő ahhoz, hogy az onnan távozó fény energiaeoszlása (amely nagyon jó közelítéssel a feketetest-sugárzásnak megfelelő) jelentősen megváltozzon, ami végső soron a fényintenzitás és kisebb mértékben a szín váltakozásában jelenik meg. A hanghullámok nagy amplitúdója a közönséges hangoknál nem jellemző jelenséget is okoz: a sűrűség intenzív változása miatt a csillag sugara is ingadozik. A csillag méretének változása csak kisebb mértékben jelenik meg a fénygörbében (a teljes kibocsátott energia a sugár négyzetével, míg a hőmérséklet negyedik hatványával arányos), azonban a fotoszféra mozgásából adódó, a megfigyelő irányába mutató sebességkomponens a színképvonalak Doppler-eltolódásából meghatározható. A csillagok esetében belátható, hogy lehetőség van az infrahang-diagnosztikára. Ráadásul a csillagok egy csoportja maga szolgáltatja a hangforrást is. A fotonok terjedésének és az anyag mozgásának kölcsönhatása adja a hangok energiaforrását. A gáz fényáteresztő képessége egyes helyeken éppen az áthaladó hullámok hatására változik. Így eltérő mértékben nyeli el az elektromágneses sugárzást, kedvező esetben hanghullámok kialakulását előidézve.

A csillaghangok megfigyelései legkönnyebben és legpontosabban egy fontos paramétert, a csillagrezgések hangmagasságát szolgáltatják. A csillagok periódusa néhány perctől több évig terjed, így frekvenciában kifejezve a hangmagasság nagyjából 10 nHz és 10 mHz közé esik. A csillaghangtartomány az infrahangok egy széles, zenei kifejezéssel 20 oktávnyi tartományába esik. A fülünk érzékenysége 10 oktávnyi terjedelmet fog át, és a legmagasabb csillaghangok és az ember számára hallható legmélyebb hangok között is körülbelül 10 oktávnyi különbség van.



2. ábra. A SOHO űrszonda és a napkorong sebességtérképe az űrszonda MDI (Michelson Doppler Imager) műszerének felvétele alapján (forrás: SOHO: ESA & NASA). A szürke skála a mért sebességeket mutatja  $-2500$  és  $2000$  m/s értékek között, a fekete a Föld irányába mozgó részeket jelzi.

Miként használhatók a csillagok infrahangjai a csillagok megismerésére, azaz diagnosztikájára? Az elsődleges adat, amire következtethetünk, a csillagok mérete. A csillagok hangjai sok szempontból a sípok hangjaihoz hasonlíthatók. Mindkét esetben állóhullámokkal találkozunk, melyek frekvenciája egyszerűen a hangsebesség és a geometriai méret hányadosával arányos. A csillagoknak megfelelő sípok mindkét oldalukon zártak, a legmélyebb hangjuk esetében éppen egy félhullám fér el bennük. A normál zenei „kis F” hang frekvenciája  $349$  Hz, amelyhez majdnem pontosan egyméteres hullámhossz tartozik, tehát egy félméteres, két végén zárt síppal szólaltatható meg. Tekintsünk egy tipikus csillagot,  $4$  napos periódussal ( $2,89 \mu\text{Hz}$  frekvencia). Ha normál levegővel töltött síppal szeretnénk ilyen hangot létrehozni, akkor méretének  $60000$  km-nek kellene lennie. Szerencsés esetben egy ilyen csillag egyéb megfigyeléséből (pl. parallaxis) meghatározhatjuk a távolságát. A fényessége és a színe alapján adódó hőmérséklet ismeretében kiszámolhatjuk a tényleges sugarát is (a távolság és a fényesség ismeretében adódik a teljes kibocsátott energia, a hőmérséklet viszont a felületesség által kibocsátott energiát határozza meg). A mérések alapján a csillag sugarára körülbelül  $24$  millió km adódhat ( $35$  napátmérő), lényegesen nagyobb, mint ami a „földi” síp alapján becsült érték. A méret  $400$ -szoros eltérését csak a hangsebesség hasonló arányú eltérése okozhatja.

A csillagok persze lényegesen bonyolultabbak a sípoknál. A felszínükről befelé haladva a hidrosztatikai egyensúly fenntartásához a nyomásnak növekednie kell, így a hangsebesség sem lehet állandó. Valójában a csillagok rezgési periódusait csak akkor használhatjuk fel belsejük megismerésére, ha a csillagszerkezet fizikai modelljeit is felhasználjuk. Megfelelő koordináta-transzformációval olyan feladat fogalmazható meg, amelyben a hangsebesség állandó, és egy közelítéssel akár olyan trombitát is tervezhetünk, amelynek lehetséges hangma-

gasságai a csillagrezgések arányait követik. Sokat segít az, ha egy csillag nem egyetlen hangon sípol, hanem egy „akkordot” szólaltat meg. Ezek az akkordok persze szokatlanok lesznek a fülünknek (ha azokat a hallható tartományba csúsztatjuk), éppen azért, mert a hangsebesség helyfüggése miatt nem az orgonasípokban megszokott hangmagasságarányok lépnek fel. Egy csillag zenéjének frekvenciaarányai annál többet árulnak el a csillag belsejéről, minél több hangot találunk.

A csillagok egy jelentős része ráadásul nemcsak a sípokhoz hasonló, egydimenziós rezgésekre képes (a korábbi esetben csak sugárirányú változások voltak), hanem felszín menti hullámok is fellépnek. A távoli csillagok ilyen hullámainak egy része még kimutatható amplitúdójú fényváltozást produkál, így a Földről is megfigyelhetők. Igazából viszont a legközelebbi csillag, a Nap az, ahol közvetlenül is megfigyelhetők a hanghullámok. A színképvonalak eltolódásából a napkorong minden egyes pontjának sebessége meghatározható.

Az így készült 2. ábrán a domináns szerkezet a Nap forgásából származó aszimmetria. A forgás után fennmaradó szerkezet azonban nagyon fontos információt takar: hasonló felvételek időbeli sorozatából megfelelő matematikai módszerekkel hangrezgések tízezrei azonosíthatók. Ezek a körülbelül  $5$  perces rezgések a Nap szerkezetének hírvivői, a magzati ultrahangvizsgálathoz hasonlóan precíz képet adnak központi égitestünk fényben láthatatlan belsejéről. Többek között a Nap belső differenciális forgását tárták fel ezek a mérések, de a Nap tőlünk nem látható oldalán lévő nagyobb napfoltok is kimutathatók az infrahang-diagnosztika segítségével.

*Kolláth Zoltán*

MTA KTM Csillagászati Kutatóintézet

További olvasnivalók:

<http://www.mindentudas.hu/kollath>

<http://www.konkoly.hu/staff/kollath/stellarmusic>